

Mejoras en la estimación de la frecuencia y magnitud de avenidas torrenciales mediante técnicas dendrogeomorfológicas

A. Díez-Herrero⁽¹⁾, J.A. Ballesteros⁽¹⁾, J.M. Bodoque⁽²⁾, M.A. Eguíbar⁽³⁾, J.A. Fernández⁽⁴⁾, M.M. Génova⁽⁴⁾, L. Laín⁽¹⁾, M. Llorente⁽¹⁾, J.M. Rubiales⁽⁴⁾ y M. Stoffel⁽⁵⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España (MEC). C/ Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid, España.
andres.diez@igme.es, ja.ballesteros@igme.es, l.lain@igme.es, m.llorente@igme.es

(2) Universidad de Castilla-La Mancha.
josemaria.bodoque@uclm.es

(3) Universidad Politécnica de Valencia.
meguibar@hma.upv.es

(4) Universidad Politécnica de Madrid.
tasio.fyuste@upm.es, mar.genova@upm.es, jm.rubiales@upm.es

(5) Universidad de Friburgo (Suiza).
markus.stoffel@unifr.ch

RESUMEN

Para prevenir el riesgo de inundación, en el análisis científico de la peligrosidad asociada a las avenidas fluviales, clásicamente se han empleado métodos hidrológico-hidráulicos y, en menor medida, histórico-paleohidrológicos y geológico-geomorfológicos. Sin embargo, estas técnicas plantean enormes incertidumbres científicas por la disponibilidad de los datos de partida, su validez espacio-temporal, y su representatividad estadística. La Dendrogeomorfología es un conjunto de técnicas que, aprovechando fuentes de información registradas en las raíces, troncos y ramas de los árboles y arbustos ubicados en determinadas posiciones geomorfológicas (banco de orilla, barras longitudinales, llanura de inundación, etc.), permite completar (e incluso suplir) el registro sistemático y paleohidrológico de avenidas torrenciales que han acontecido en esa corriente. En este artículo se propone investigar, se muestran los resultados-tipo y se discute sobre la aplicación y limitaciones de las fuentes de datos y los métodos científicos derivados del análisis dendrogeomorfológico. Para llevarlo a cabo, se sugiere una combinación de métodos de adquisición de datos en campo, estudios de laboratorio y análisis de datos en gabinete, con un plan de trabajo que contempla doce tareas o actividades: 1, caracterización geomorfológica; 2, caracterización florística; 3, muestreo de ejemplares; 4, adquisición de datos topográficos detallados; 5, preparación de las muestras; 6, conteo y medida de los anillos de crecimiento; 7, estudio anatómico e histológico; 8, sincronización de las series; 9, detección y datación de eventos; 10, modelación hidráulica de tramos; 11, análisis estadístico de caudales de avenida; y 12, cartografía de las áreas de peligrosidad por avenidas torrenciales y mapas de riesgo.

Palabras clave: avenida, dendrogeomorfología, inundación, riada, riesgo

Improving flood frequency and magnitude estimates using dendrogeomorphological techniques

ABSTRACT

In order to prevent flood risks, scientific fluvial flood hazard analysis has been carried out traditionally with hydrologic and hydraulic methods, and secondarily, using palaeohydrological-historical and geological-geomorphological methods. Nonetheless, these techniques pose countless uncertainties due to the availability of the data, their spatio-temporal validity and their statistical representativeness. Dendrogeomorphology is a set of techniques that takes advantage of sources of information registered in roots, trunks and branches of trees or treelike bushes placed in certain geomorphological locations (such as banks, longitudinal bars, flood prone areas, etc.), that may be useful to complete the systematic registry or paleohydrologic data of torrential floods that have occurred in a certain stream. The aim of this paper is to research the usefulness and limitations of the data sources and methodologies derived from the dendrogeomorphological analysis. For accomplishing this objective a combination of methods is proposed, from data acquisition methods in field, laboratory studies, to data analysis. The schedule comprises twelve tasks: 1, geomorphologic characterization; 2, floristic characterization; 3, species sampling; 4, acquisition of detailed topographic data; 5, sample arrangement; 6, growth ring count and measurement; 7, histologic and anatomic study; 8, series synchronization; 9, event detection and dating; 10, hydraulic reach modelling; 11, flow data statistical analysis; y 12, hazard and flood prone areas cartography and risk mapping.

Key words: dendrogeomorphology, flood, geological hazard, natural risk, tree-ring

Introducción y planteamiento

Para el análisis científico-técnico de la peligrosidad de inundaciones fluviales, clásicamente se han empleado métodos hidrológico-hidráulicos y, en menor medida, geológico-geomorfológicos (Díez, 2002; Díez *et al.*, 2006). Sin embargo, la aplicación de estas técnicas a las cuencas torrenciales de zonas montañosas plantea enormes incertidumbres científicas por la reducida disponibilidad de los datos de partida, dada la escasez e incluso ausencia de estaciones meteorológicas y foronómicas; su validez espacio-temporal, teniendo en cuenta la irregular distribución altitudinal (concentradas en núcleos urbanos de zonas bajas) y la discontinuidad temporal de las series; y su representatividad estadística, cuando se dispone de muestras inferiores a la treintena de datos.

En estos casos, para completar el registro sistemático de datos, se suele recurrir a la información no sistemática, tanto histórica como paleohidrológica del registro geológico (Benito y Thorndycraft, 2004). No obstante, muchas de las zonas analizadas, sobre todo en áreas montañosas, no disponen de documentación sobre inundaciones históricas al encontrarse alejadas de los centros administrativos y focos de producción documental; ni de registro de depósitos de inundación, al no disponer de materiales detríticos en el área fuente, o de lugares propicios para su depósito (por las altas velocidades de la dinámica torrencial) o mantenimiento. Por ello, ante la ausencia de datos de partida, se hace muy difícil aplicar análisis estadísticos fiables o modelación hidrometeorológica suficientemente calibrada y validada.

En estas zonas de montaña, por sus condiciones edafo-climáticas y su difícil acceso para roturación, frecuentemente se han conservado importantes masas boscosas. Por ello, lo que sí que es fácil y frecuente localizar en casi todos los cauces torrenciales, es la presencia de vegetación de porte arbóreo, ya sean especies riparias o no, próximas a las orillas. Formaciones vegetales que, en su patrón de distribución y en los ejemplares individuales, se ven afectadas en su crecimiento por la interferencia con las avenidas torrenciales que tienen lugar en estos cauces y sus márgenes.

Antecedentes: la Dendrogeomorfología y sus métodos

El desarrollo de la Dendrogeomorfología es relativamente reciente, sobre todo si se compara con otras subdisciplinas próximas, como la Dendroclimatología. En realidad, todas ellas derivan de la Dendrocronología, técnica que data los anillos de crecien-

to de los árboles, con el fin de caracterizar y sincronizar los cambios de índole ambiental que tienen lugar en el medio, o de datar restos arqueológicos. Los orígenes más remotos se remontan a las observaciones de Leonardo da Vinci en el tránsito entre los siglos XV y XVI, pero no es hasta inicios del siglo XX cuando se establecen los fundamentos teóricos (Douglass, 1909 y 1914). Sin embargo, sus leyes y principios, a pesar de tener su origen en teorías del siglo XVIII como el Uniformitarismo, no se enuncian explícitamente hasta el último tercio del siglo XX (Fritts, 1976): uniformitarismo, factores limitantes, amplitud ecológica, crecimiento agregado de anillos (Cook, 1990), selección del emplazamiento, réplica, y datación cruzada.

Los primeros estudios dendrogeomorfológicos, esto es, sobre la relación entre los anillos de crecimiento de los árboles y los procesos geomorfológicos, datan de la década de 1960 (La Marche, 1963), pero no es hasta unos años después cuando aparecen las primeras publicaciones en las que se introduce ese término (Alestalo, 1971). En general, se trata de aplicaciones de las técnicas dendrocronológicas al estudio de procesos erosivos de degradación de suelos, nivales (aludes de nieve), movimientos de ladera (desprendimientos, avalanchas de rocas...) y datación de superficies.

Más reciente aún es la aplicación de los análisis dendrogeomorfológicos al estudio de los eventos ligados a la dinámica torrencial, como las corrientes de derrubios (*debris flows*) y las avenidas instantáneas o relámpago (*flash floods*), en lo que se ha venido a llamar Dendrohidrología (Schweigruber, 1996). Los primeros trabajos con estas aplicaciones se remontan también a la década de 1960 (Sigafos, 1964; Harrison y Ried, 1967), pero no es hasta la década de 1980 cuando se estandarizan, con los estudios de Yanosky (1982a y b, 1983), Hupp (1984, 1986, 1988), Hupp *et al.* (1987) y McCord (1990). Desde ese momento, se difunde el uso de estas técnicas y fuentes de información, aunque en la actualidad con un alcance geográfico muy limitado a Norteamérica y Centroeuropa (Coriell, 2002; Wilford *et al.*, 2005). Es curioso y significativo que, en ambos casos, la iniciativa de la creación de los laboratorios y equipos de investigación suele partir del ámbito de las Ciencias de la Tierra (Geología y/o Geografía), como principales usuarios de los resultados de estas técnicas; del mismo modo, muchos de los trabajos pioneros se publicaron precisamente en revistas del ámbito geológico y no botánico-forestal, como los *U.S. Geological Survey Professional Papers* (Sigafos, 1964; Yanosky, 1982a y 1983; Hupp *et al.*, 1987), o *Environ. Geol. Water Sci.* (Yanosky, 1982b; Hupp, 1984).

Si bien existe ya una experiencia acumulada de más de cuatro décadas en este tipo de estudios en el extranjero, y tras unos años de latencia en la década de 1990 (con un menor número de publicaciones), el estado actual de conocimientos y métodos es consecuencia de la evolución y perfeccionamiento reciente de las técnicas en cuatro aspectos:

- Los elementos botánicos estudiados. En los trabajos iniciales sólo se empleaban las evidencias externas, como cicatrices de corrosión, bifurcaciones en la base del tronco, ramas adventicias y crecimientos excéntricos. Sin embargo, hoy en día se emplean además muchas otras anomalías de crecimiento en el patrón de anillos; son las llamadas perturbaciones del crecimiento (*growth disturbances*, *GDs*), como las filas causadas por traumatismos en los canales resiníferos (TRDs; Bollschweiler *et al.*, 2007) u otros elementos en los tejidos de las frondosas (p.e. fibrotraqueidas, cruces de San Andrés...).
- Las técnicas de datación de los eventos. Antiguamente se aplicaban simples conteos de los anillos, sin considerar la posible existencia de anillos ausentes o múltiples; hoy en día el estado actual de conocimientos requiere el uso de sincronización por datación cruzada.
- El detalle de la información extraída. Antaño sólo se estudiaban los anillos como elementos indivisibles, mientras que hoy en día se aplican técnicas de histología y citología vegetal (Bodoque *et al.*, 2005; Rubiales *et al.*, 2007) que permiten descender a escala de zona dentro del anillo, y así discernir incluso la época del año y mes en que se produjo la perturbación (Stoffel *et al.*, 2006); y diferenciar entre distintos procesos en zonas montañosas (aludes, avenidas, corrientes de derrubios...).
- La incorporación de otros elementos de análisis para obtener información complementaria del origen del evento, como el fraccionamiento isotópico del oxígeno en la alfa-celulosa de la madera de los anillos como indicador del origen de la precipitación generadora del evento extremo; tal y como se ha empleado en el estudio de los huracanes en el golfo de Méjico (Miller *et al.*, 2006), y que podría ser igualmente empleado para discernir entre avenidas relámpago producidas por lluvias frontales, orográficas o convectivas.

Por lo que se refiere a la investigación dendrogeomorfológica en España, apenas existe media docena de grupos que hayan usado estas técnicas aplicadas a riesgos naturales (Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad de Barcelona, Universidad Complutense de Madrid, Universidad de Castilla-La Mancha,

IGME y CSIC), principalmente al estudio de movimientos de ladera (caídas de rocas, deslizamientos...), aludes de nieve, incendios, sequías y erosión de suelos. En total se han publicado unos 40 trabajos sobre estudios dendrogeomorfológicos en la península Ibérica, que han sido recientemente recopilados (Díez *et al.*, 2007) y buena parte de los cuales pueden ser consultados en Internet (Ballesteros, 2007). Existen en nuestro país citas muy remotas de la interacción de las avenidas torrenciales con la vegetación arbórea, como la descripción de Colmenares (1637) de un evento ocurrido en la falda de la Sierra de Guadarrama (Segovia) en 1540: "...un espantoso nublado... descargando en las faldas y valles de Peñalara y Sietepicos con tan furiosos torbellinos, que moviendo los peñascos arrancaba los pinos de cuajo". Sin embargo, los únicos trabajos publicados que hasta el momento han empleado o citado el uso de técnicas dendrogeomorfológicas para el estudio de la dinámica fluvial y de las avenidas son los de: Díez (2001-2003), que describe las evidencias dendrogeomorfológicas asociadas a las avenidas del río Alberche en Navalunga (Ávila); y Saz *et al.* (2004), quienes utilizan estas técnicas para datar los depósitos actuales y subactuales del barranco de la Morera (sector central del Valle del Ebro, Zaragoza).

Metodología general

La aplicación de la Dendrogeomorfología al estudio de las avenidas torrenciales requiere hacer uso de una combinación e integración de técnicas y métodos procedentes, tanto del ámbito de la Dendrocronología (Botánica, Ecología, Fisiología y Anatomía Vegetal, Histología...), como de las ciencias dedicadas al estudio de la dinámica fluvial (Hidrología, Hidráulica, Geomorfología...). En definitiva, se podría estructurar la metodología en una docena de actividades, que aplican de forma simultánea y complementaria enfoques de análisis y síntesis, compaginando secuencialmente métodos de adquisición de datos en campo, métodos de estudio en laboratorio, y métodos de tratamiento y análisis en gabinete.

Métodos de adquisición de datos en campo

Caracterización geomorfológica

La caracterización geomorfológica de las cuencas torrenciales estudiadas se realiza mediante métodos clásicos de cartografía y descripción de formas y depósitos, utilizando tanto fotointerpretación de

pares estereoscópicos de fotografías aéreas verticales (distintas fechas y escalas), como interpretación de la cartografía básica (morfometría, hidrografía, toponimia...) y temática (mapas geológico, geomorfológico, formaciones superficiales, procesos activos...). Ello requiere además la realización de recorridos de campo para comprobar la cartografía, resolver zonas problemáticas, evaluar el grado de actividad de los procesos activos, y determinar la potencia y origen de las formaciones superficiales, con especial incidencia en aquéllas de origen fluvio-torrencial. Paralelamente, se hace la necesaria caracterización geológica-litológica de las zonas, el estudio del contexto climatológico y edáfico, y el análisis de la dinámica hidrológica superficial y subterránea.

Caracterización florística

La caracterización florística de las cuencas torrenciales y su entorno se realiza también empleando métodos clásicos, como: la cartografía de la vegetación mediante fotointerpretación de ortofotos y fotografías aéreas verticales (distinguiendo especies, asociaciones, edades y grado de cobertura); la realización de inventarios florísticos mediante parcelas homogéneas (10x10 m), evitando cambios bruscos relacionados con el sustrato y la topografía; y los transectos, tanto longitudinales a lo largo del desarrollo altitudinal de las laderas (catenas), como transversales a las corrientes torrenciales estudiadas, indicando distintos parámetros cuantitativos y estructurales de la vegetación, algunos de ellos reflejando los daños en los árboles (árboles vivos y muertos, adultos o jóvenes, con heridas visibles o no, forma del tronco, distancia a la corriente central, y diámetro a la altura del pecho).

Muestreo de ejemplares

El muestreo de ejemplares individuales de árboles y arbustos comienza con una rigurosa y objetiva selección de los mismos, basada en criterios de caracteres externos susceptibles de evidenciar la interferencia entre el ejemplar y la dinámica torrencial. Estas evidencias externas, denominadas indicios dendrogeomorfológicos, pueden ser (Tabla 1 y Figura 1): descortezados y marcas de impacto; crecimientos de ramas en candelabro; pérdida de copas y partes culminantes; erosiones, bifurcaciones e inclinaciones en los troncos; y raíces expuestas. También se muestrean ejemplares no perturbados (alejados de la dinámica torrencial), para que sirvan de patrón de compara-

ción (series de referencia) de los ritmos de crecimiento, y discernir anomalías debidas a variabilidad climatológica, plagas y epidemias.

Asimismo se procura que ese muestreo se realice de forma ordenada y científica, para que su posterior tratamiento estadístico sea representativo. Además se seleccionan especies vegetales de crecimiento homogéneo, dando prioridad a aquéllas incluidas como más idóneas en los listados especializados (preferiblemente coníferas; ver idoneidad de las especies en Grissino-Mayer, 1993), por su adecuado reconocimiento de los anillos anuales, y escasa tendencia a la formación de anillos ausentes o múltiples.

Cada ejemplar a muestrear es convenientemente localizado (mediante receptor GPS) y siglado (mediante etiquetado unívoco), apuntándose todos los caracteres del mismo (especie, subespecie, dimensiones, estado, grado de dominancia...) y del medio circundante (sustrato, pendiente, orientación de la ladera, proximidad de otros ejemplares, distancia al río...) reseñables. Posteriormente se realiza, según la gestión forestal que se haga del mismo y el elemento a estudiar (tronco, ramas, raíces...), bien

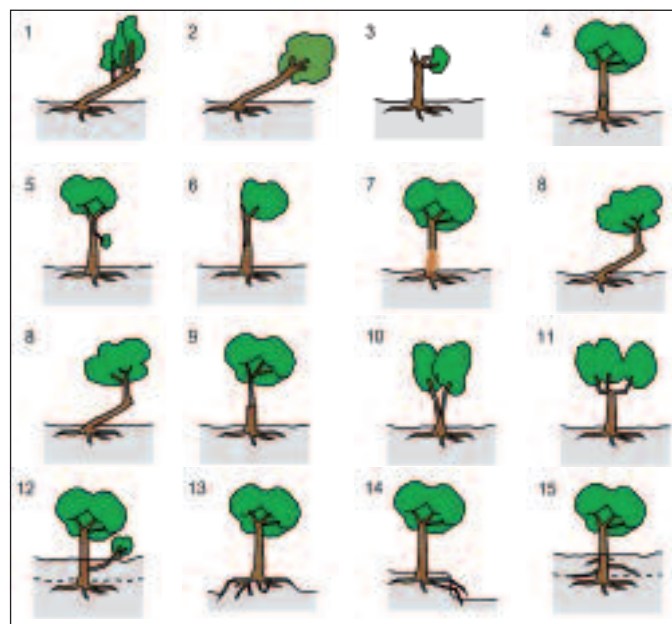


Figura 1. Tipologías de los principales indicios dendrogeomorfológicos macroscópicos individuales útiles en el estudio de las avenidas torrenciales. La numeración corresponde con los tipos de indicio de la Tabla 1, referidos a un individuo (árbol o arbusto)

Figure 1. Individual macroscopic dendrogeomorphological main evidences types useful in torrential flood studies. Numbering corresponds to the type of sign in Table 1 referred to one individual (tree or bush)

una extracción de testigo cilíndrico, o bien una cuña o rodaja (utilizando sierra manual o motosierra).

En el primer caso, la extracción de las muestras de árboles en pie se realiza en dirección aproximada a la del radio del fuste, utilizando la barrena de Pressler estándar de 400 mm de longitud y 5 mm de diámetro interior, lo cual permite obtener una representación de todos los anillos de crecimiento formados desde la corteza hasta el interior del tronco. Habitualmente se extraen a 1,30 m del suelo, excepto en aquellos casos en que, por deformaciones y defectos del tronco o la aparición de ramas bajas, ello no sea posible y se toman a menor altura; sin embargo es conveniente extraerla lo más bajo posible, para recopilar la serie de anillos más completa que se pueda obtener. De cada ejemplar se obtienen, generalmente, dos testi-

gos con orientaciones opuestas y lo más largos posibles, pues la elaboración de dos secuencias dendrocronológicas por ejemplar facilita los procesos de sincronización y su media es una mejor aproximación al crecimiento real en grosor.

Las muestras se insertan tras su extracción en un soporte de madera, con una ranura de un diámetro próximo al de la muestra, y se pegan con cola blanca de carpintería, lo cual facilita un secado paulatino e impide su deformación o rotura por efecto de posibles grietas.

También se están ensayando otras técnicas de muestreo y estudio no destructivo del árbol, como la monitorización del tronco con resistógrafos o propagación de ultrasonidos, que permitan detectar en el interior la presencia de discontinuidades en la made-

ESCALA ESPACIAL		ELEMENTO ESTUDIADO		TIPO DE INDICIO		
km hm	Macroscópica	Comunidades y formaciones vegetales		Patrones en la distribución de especies Patrones en la distribución de las coberturas Patrones en la distribución de las edades		
Dm		Árbol o arbusto completo		Crecimientos en candelabro Inclinaciones y pies volcados Decapitados (pérdida de copas)		
m		Individuo (árbol o arbusto)	Parte del árbol o arbusto	Tronco (fuste)	Descortezados (descorchados) con callo	Impacto de carga sólida
						Rozamiento por caída de otros troncos
					Arranque de ramas	
					Erosiones	
Codos y ángulos						
Estrechamientos bruscos						
Bifurcaciones						
dm				Ramas	Codos y ángulos	
			Rebrotos desde troncos enterrados			
cm			Raíces	Raíces expuestas	Descortezadas y con erosiones	
					Flotantes sin contacto con el sustrato	
Nuevas raíces desde tronco enterrado						
mm			Mesoscópica	Testigos, cuñas y rodajas	Anillos	Crecimientos excéntricos (madera de reacción)
	Falsos anillos o anillos ausentes					
	Discontinuidades, erosiones y cicatrices internas					
	Cambios en parámetros (anchura, % madera temprana y tardía...)					
µm	Microscópica	Lámina delgada	Tejidos	Ratio tejido celulósico / tejido lignificado		
				Densidad de poros, vesículas y vasos		
			Células	Cambios en los parámetros celulares	Tamaño y diámetro de luz celular	
					Grosor de la pared celular	
				Aparición y/o abundancia de tipos especiales de células y estructuras	Conductos resiníferos traumáticos (TDRs)	
					Cruces de San Andrés	
					Fibrotraqueidas	
					Estructuras thyllosas	
Depósitos gomosos						

Tabla 1. Clasificación de los principales indicios dendrogeomorfológicos útiles en el estudio de las avenidas torrenciales, en función de la escala del elemento estudiado.

Table 1. Element scale based classification of the main dendrogeomorphological evidences useful in torrential flood studies.



Figura 2. Ejemplo de indicio dendrogeomorfológico macroscópico: crecimiento de ramas adventicias en candelabro a partir de un fuste inclinado y partido; ejemplar de aliso (*Alnus glutinosa*) en una barra media longitudinal de gravas del río Alberche a su paso por Navalunga (Ávila)

Figure 2. Example of a macroscopic dendrogeomorphological evidence: adventitious candelabrum branches growth from a tilted and wrecked shaft; alder tree (*Alnus glutinosa*) in a longitudinal gravel bar in the Alberche river, in the neighbourhood of Navalunga (Ávila)



Figura 3. Ejemplos alineados de indicios dendrogeomorfológicos macroscópicos: bifurcaciones del fuste en horquilla; ejemplares de aliso (*Alnus glutinosa*) en las márgenes del arroyo Cabrera (Venero Claro, Sierra de Gredos oriental); parecen indicar un nivel correlacionable y una misma edad de un evento de avenida pretérito

Figure 3. Lined up examples of macroscopic dendrogeomorphological evidences. Fork-like bifurcations of shafts in alder trees (*Alnus glutinosa*) in the banks of Cabrera stream (Venero Claro, eastern Sierra de Gredos). Evidences apparently show a correlating level and the same age of a past flooding episode



Figura 4. Ejemplo de indicio dendrogeomorfológico macroscópico: descortezado o descorchado por impacto de carga sólida de la corriente, con formación de un callo de reacción; varios bordes de callos inscritos unos dentro de otros, permiten reconocer al menos tres eventos de avenida torrencial; ejemplar de fresno (*Fraxinus angustifolia*) en la margen derecha del arroyo Cabrera (Venero Claro, Sierra de Gredos oriental)

Figure 4. Example of a macroscopic dendrogeomorphological evidence: damaged tree-crust due to the impact of the bed load (scar) and growth of a reaction callus. Several callus are found to grow inside older callus, indicating at least three torrential flooding events. Narrow-leaved Ash (*Fraxinus angustifolia*) on the right bank of the Cabrera stream (Venero Claro, eastern Sierra de Gredos)

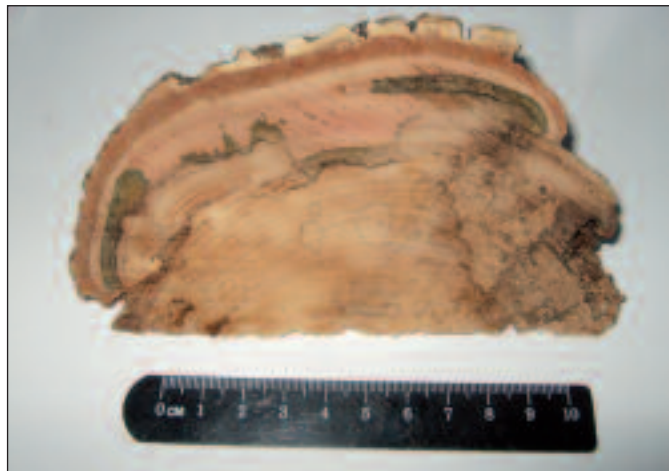


Figura 5. Ejemplo de indicio dendrogeomorfológico macroscópico: sección de una cuña extraída del callo formado en un descortezado por impacto (Figura 4); la disposición de los anillos en el callo nos permite reconocer, al menos, tres eventos sucesivos de avenida separados por unos pocos años; ejemplar de fresno (*Fraxinus angustifolia*) en la margen derecha del arroyo Cabrera (Venero Claro, Sierra de Gredos oriental)

Figure 5. Example of a macroscopic dendrogeomorphological evidence: wedge section from callus growing after impact (Figure 4); the tree-ring disposition in the callus allows us to differentiate at least three consecutive flood events occurring within few years; Narrow-leaved Ash (*Fraxinus angustifolia*) on the right bank of the Cabrera stream (Venero Claro, eastern Sierra de Gredos)

ra, y así dirigir el muestreo a esas zonas, no siendo preciso la extracción de cuñas, y bastando la obtención de testigos con barrena en esas zonas.

Adquisición de datos topográficos detallados

En los tramos de la corriente torrencial donde se localicen y muestreen ejemplares con evidencias de interferencia con avenidas, se realizan levantamientos topográficos detallados a escala 1:200 ó superior, utilizando una combinación de receptores GPS en modo diferencial, y estación total taquimétrica, en función de las características topográficas y de vegetación del entorno. En dichas topografías se ubicarán los ejemplares muestreados con mayor precisión. Además se realizarán perfiles longitudinales y transversales a la corriente y registro de puntos singulares de utilidad en los modelos hidráulicos. Todo ello se introduce y gestiona desde un sistema de información geográfica, que permita un adecuado almacenamiento y análisis de la misma (obtención de MDEs, vistas 3D, esquemas de pendientes, perfiles y secciones, cálculos de longitudes, áreas y volúmenes, etc.). También se puede estudiar el empleo de adquisición por barrido láser (*laser scanning*), una moderna técnica de adquisición de información topográfica muy detallada (millones de puntos por unidad de superficie), que está empezando a ensayarse para geomorfología fluvial de tramos de ríos (Heritage y Hetherington, 2007).

Métodos de estudio en laboratorio

Preparación de las muestras

Las muestras recogidas en campo (testigos, cuñas o rodajas) son adecuadamente preparadas para su estudio, siendo preciso en ocasiones su cortado, pulido, limpieza y secado (en estufa o al aire libre). Una vez secas las muestras y tras extraerlas de su soporte de madera, se realizan cortes longitudinales y perpendiculares a la dirección de las traqueidas en toda su longitud. Para ello se colocan las muestras o testigos en un tornillo de carpintero y se cortan al ras lo más finamente posible con una cuchilla enmangada bien afilada, poniendo el máximo cuidado en evitar su rotura, con lo que se consiguen visualizar de forma correcta y adecuada los anillos de crecimiento. Posteriormente se contabilizan y marcan por grupos los anillos de los testigos y se señalan las áreas que, eventualmente, pueden presentar problemas de medición. En otras ocasiones y especies no tan idóneas para la observación, las labores de preparación

conllevan también las tinciones con colorantes, como el azul de metileno o safranina.

Conteo y medida de los anillos de crecimiento

La medición de las muestras y la obtención de series dendrocronológicas datadas se lleva a cabo empleando equipos semiautomáticos, como la mesa de medición LINTAB (comercializada por la empresa Rinntech), asociada al programa TSAP-Win (*Time*



Figura 6. Ejemplo de indicio dendrogeomorfológico macroscópico: raíces expuestas por erosión de un banco de orilla durante un evento de avenida torrencial; pino resinero (*Pinus pinaster*) en las márgenes del arroyo Cabrera (Venero Claro, Sierra de Gredos oriental)

Figure 6. Example of a macroscopic dendrogeomorphological evidence: uncovered (exposed) roots due to bank erosion during a torrential flood event. Maritime pine (*Pinus pinaster*) on the banks of the Cabrera stream (Venero Claro, eastern Sierra de Gredos)

Series Analysis and Presentation, Rinntech) acoplado a PC, que permite una precisión en la medida de hasta 0,01 mm. Otros equipos imprescindibles son: lupa binocular, fuente de luz fría y otros programas específicos para el tratamiento de datos dendrocronológicos, como WinDENDRO (empresa Régent Instruments).

Estudio anatómico e histológico

Tras el tratamiento de las muestras mediante disolventes y tinciones (histoclear, alcohol, safranina...) y su preparación para observación microscópica (cortado de la lámina delgada con microtomo para su colocación sobre portaobjetos), se procede a su estudio en lupa binocular y microscopía óptica de luz transmitida con campo oscuro. Se adquieren imágenes microscópicas en formato digital para posteriormente procesarlas utilizando aplicaciones de tratamiento de imágenes, como Image-Pro Plus (empresa MediaCybernetics).

En las imágenes se observan las anomalías en los tejidos y células asociadas a eventos de crecidas torrenciales, con especial incidencia en: anchura del anillo, número de células, tamaño de las células, volumen celular interno, espesor de la pared celular, tipo de límite madera tardía-temprana, porcentaje de madera tardía, canales resiníferos (filas causadas por traumatismos, TRDs), número de traqueidas, diámetro máximo de la luz de las traqueidas...

Finalmente se llevarán a cabo análisis de varianza (ADEVA) de las diferentes variables consideradas en el análisis anatómico, para verificar o no diferencias estadísticamente significativas entre distintos grupos de medidas.

Métodos de tratamiento y análisis de los datos en gabinete

Sincronización de las series y datación de anillos

La datación consiste en la transformación de las series de incrementos de crecimiento en secuencias dendrocronológicas, mediante la asignación precisa de fechas que asegure que cada valor se corresponde con el año en que fue formado el anillo de crecimiento.

Los análisis dendrocronológicos previos a la datación requieren la existencia de ciertas pautas comunes de variación en las series de crecimiento de los árboles. El grosor de los anillos formados simultáneamente en diferentes individuos no suele presentar coincidencias en sus valores, a causa de diferencias

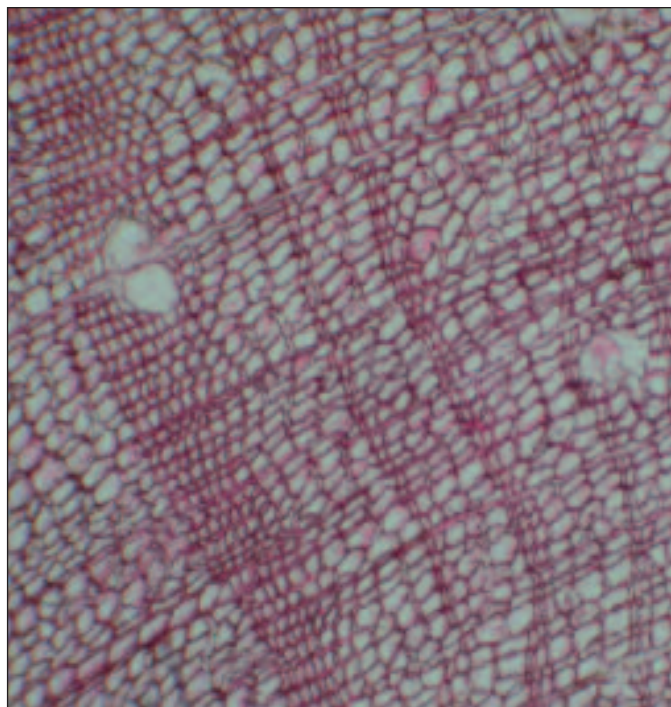


Figura 7. Ejemplo de indicio dendrogeomorfológico microscópico: sección de madera de raíz de pino silvestre (*Pinus sylvestris*), donde se observa el cambio en el patrón de distribución celular a partir del año (anillo) en el que se produce la exposición a la luz solar como consecuencia de la erosión del suelo

Figure 7. Example of a macroscopic dendrogeomorphological evidence: Scots pine (Pinus sylvestris) root section where it can be observed the pattern change of the cell distribution since the year (tree-ring) in which the root is exposed to the sun light as a consequence of the soil erosion

en cuanto a la edad o en relación con muchos otros factores intrínsecos o extrínsecos, pero tampoco cuando proceden de un mismo individuo en diferentes orientaciones (por razones similares) y por ello es preciso utilizar diversas técnicas que permitan comparar las series entre sí y localizar patrones sincrónicos de crecimiento. Asimismo es preciso detectar posibles errores de conteo y medida y, sobre todo, localizar determinadas anomalías en las series de crecimiento.

Las diferentes técnicas de sincronización consisten, básicamente, en la comparación de numerosas series de crecimiento mediante análisis cualitativos y cuantitativos que pueden emplearse alternativa o simultáneamente y que, en cualquier caso, resultan ser complementarios. En la aplicación de estas técnicas se utilizan programas específicamente dendrocronológicos, entre los que destaca la aplicación COFECHA (Grissino-Mayer, 2001). Ello sin descartar el

uso de otras herramientas estadísticas, y de observaciones comparativas más intuitivas.

Los resultados de la aplicación de las distintas técnicas de sincronización permiten la corrección de las anomalías o errores detectados en las series y la aceptación o el rechazo de éstas como representativas o coincidentes con los patrones locales de crecimiento. Su aplicación ofrece una gran complejidad y requiere un arduo aprendizaje para obtener la necesaria experiencia que permita tomar las decisiones más adecuadas en cada problema planteado. La comparación cruzada se realiza muchas veces utilizando diferentes series o, incluso, entre series parciales, medias individuales o cronologías cercanas ya establecidas, hasta verificar la correcta datación del conjunto de las secuencias de una localidad o región. Ello permite, finalmente, elaborar un banco de datos por localidad de series dendrocronológicas individuales datadas que, posteriormente, podrá utilizarse en diferentes aplicaciones.

Detección y datación de eventos

A partir de las series de anillos sincronizados se puede proceder a la datación de los elementos anatómicos asociados a fenómenos torrenciales (*growth disturbances* –GDs–, como canales resiníferos traumáticos –TRDs–, heridas, tejidos de callos, maderas de reacción, reducción o aumento del crecimiento, falsos anillos); y a la obtención de un listado o base de datos de eventos de avenida con fechas asignadas, indicando si se trata de fechas fijas o aproximadas, y el tipo de evidencia marca nivel máximo, mínimo o exacto. Igualmente, en función de en qué parte del anillo se sitúen las GDs (madera tardía o temprana), puede incluso inferirse la época del año (a nivel estacional y en ocasiones con precisión mensual), en la que se produjo el evento.

También se investiga sobre la posible identificación de eventos de avenida que produjeron desenterramiento y exposición del aparato radicular de árboles (por ejemplo, por erosión de bancos de orilla o efecto pedestal en barras e islas), y que pudieron derivar en la disminución de la producción de aparato foliar (copa), observándose posibles cambios en el patrón de anillos del tronco a la altura estándar (1,30 m).

Estas fechas, especialmente las que se repitan y sean comunes, son contrastadas con los registros históricos próximos de precipitaciones intensas y crecidas, allí donde exista información hidrometeorológica (Stoffel *et al.*, 2003). Con la información se calculan índices de similitud y probabilidades condicionales.

También, al objeto de calibrar los elementos utilizados para la detección de eventos y su datación, se utilizan los mismos métodos y fuentes de datos aplicados sobre eventos recientes bien estudiados, y de los que se conservan numerosos efectos en la vegetación ribereña.

Modelación hidráulica de tramos

A partir de las topografías de detalle de los tramos de las corrientes fluviales, y de la localización y altura de los elementos asociados a fenómenos torrenciales, se elaboran diferentes modelos hidráulicos que permiten aproximar el orden de magnitud de los caudales circulantes durante dichos eventos, y su dinámica (rangos de velocidades, calados, energía, potencial contenido en carga sólida). Para ello se emplean tanto adaptaciones a corrientes de alta pendiente de los modelos unidimensionales (Lang *et al.*, 2004) en régimen gradualmente variado (aplicaciones tipo HEC-RAS; Brunner, 2002), como fórmulas y cálculos específicamente adaptados a las situaciones de las corrientes torrenciales: fórmula simplificada para localizaciones de régimen crítico (Daugherty *et al.*, 1989) y fórmulas de la sobreelevación en curvas de meandro (Pierson y Costa, 1987).

Se requiere un análisis de detalle del flujo supercrítico que, de manera general, va a darse en este tipo de cauces. En este análisis se presta especial importancia al carácter transitorio de la corriente, a su densidad condicionada por fenómenos de arrastre, y a las pérdidas de energía localizadas, factor importante en este tipo de corrientes. El nivel de detalle del trabajo requiere de un análisis bidimensional del flujo en localizaciones como conos y abanicos, y bifurcaciones, que permite conocer con detalle cada caso analizado, y permite extrapolar los resultados con un cierto grado de aproximación.

Previamente se precisan los MDE derivados de los levantamientos topográficos y medidas con GPS diferencial (ver tarea de campo), el establecimiento de unas condiciones de contorno, y la adquisición de información sobre parámetros, tales como los coeficientes de rugosidad, o las funciones caudal-energía de las estructuras hidráulicas que pueda haber en el cauce (puentes, vertederos, azudes...).

Los modelos tratarán de ser calibrados allí donde se disponga de marcas y medidas, y serán sometidos a diferentes análisis de sensibilidad, tanto de las condiciones de contorno como de la rugosidad y variaciones geométricas.

Análisis estadístico de caudales de avenida

Una vez que se dispone de las fechas de los eventos de avenida torrencial y de la estimación de sus caudales, se trata de realizar con los mismos un análisis estadístico que permita ajustar una función de distribución de frecuencias a dichos caudales. Para ello se emplean diversas fórmulas de asignación de la probabilidad muestral a los distintos eventos, según sean niveles exactos, mínimos o máximos, y su grado de certidumbre (clasificación en tipos exacto -EX-, mayor -LB-, menor -UB- e intervalo -DB-; Francés, 2004); y se emplean funciones de distribución de frecuencia específicas (tanto para modelos estacionarios como no estacionarios), basadas en el establecimiento de umbrales o rangos, y que ya han sido empleadas con éxito para la incorporación de datos históricos y paleohidrológicos; entre ellas valores extremos con cuatro parámetros (EV4), log-normal de cuatro parámetros de tipo Slade (LN4) y valores extremos transformados de Eliasson (ETEV), con nuevos algoritmos de estimación de parámetros, como EMA (Francés, 2004). Al objeto de facilitar estos análisis, se emplean de forma comparada diferentes aplicaciones informáticas que implementan dichas formulaciones, como los programas FRESH (Universidad de Québec; Ouarda *et al.*, 2004), AFINS (Grupo de Investigación de Hidráulica e Hidrología; Universidad Politécnica de Valencia) y MAX (Stedinger *et al.*, 1988). Para finalizar, se realizan estos mismos análisis incorporando los datos procedentes de la dendrogeomorfología en series de caudales del registro sistemático procedentes de estaciones de aforo próximas, observándose la posible mejora del ajuste mediante la aplicación de distintos test estadísticos (Kolmogorov-Smirnov, PPCC, relación de L-momentos, etc.).

Cartografía de las áreas de peligrosidad por avenidas torrenciales y mapas de riesgo

Una vez establecidos y mejorados los cuantiles de caudales asociados a diferentes frecuencias o periodos de retorno en cada corriente y localización, se procede a su expresión cartográfica mediante la realización de mapas de peligrosidad que combinen diferentes parámetros: áreas potencialmente inundables, profundidad, velocidad de la corriente, tiempo de permanencia, carga sólida transportada... Para ello se combinan modelos hidráulicos uni- y bidimensionales (aplicaciones HEC-RAS, MIKE11 y MIKE21) con los sistemas de información geográfica (programas ArcView, ArcGIS y ArcInfo) empleando extensiones y

módulos de conexión (tipo HEC-GeoRAS o MIKE-FLOOD). Del cruce de estas cartografías en el SIG con las coberturas que contienen los elementos expuestos y su vulnerabilidad, derivará un mapa de riesgo de inundación en estas zonas (Díez *et al.*, 2006).

Resultados y discusión de su aplicación

El principal resultado de la aplicación de las técnicas dendrogeomorfológicas al estudio de las avenidas torrenciales, como se ha venido detallando, es una base de datos de eventos pretéritos de avenida a los que se asignarán fechas (con precisión anual e incluso estacional) y magnitudes, bien en forma de caudales o de otros parámetros físicos (extensión del área afectada, profundidad, velocidad, carga sólida...). Dicha base de datos podría emplearse en la mejora tanto en la estimación de la frecuencia como en la determinación de magnitudes de los eventos, y su posterior aplicación al análisis de la peligrosidad y la adopción de medidas preventivas del riesgo.

La incorporación de los eventos pretéritos de la base de datos como datos no sistemáticos supondrá siempre una mejora en el estudio estadístico de la frecuencia, bien porque amplía la longitud de la muestra cuando se dispone de un registro de datos sistemáticos (de caudales o precipitación); o bien porque no existen datos sistemáticos y por tanto el registro dendrogeomorfológico de eventos es la única fuente de datos disponible. Sin embargo, en el caso de que los datos no sistemáticos se añadan a los del registro sistemático, para que dicha mejora sea significativa (ganancia estadística asintótica) y permita aumentar la fiabilidad en la estimación de valores asociados a periodos de retorno medios (50-100 años) es necesario que la longitud temporal de la serie no sistemática (tamaño del periodo de observación), sea de al menos esa duración (100-200 años); así lo ponen de manifiesto diversos estudios realizados para información no sistemática de carácter histórico (Francés, 1998; Francés, 2004). Sin embargo, no siempre se dispone de series tan extensas de datos no sistemáticos de origen dendrogeomorfológico, puesto que la longevidad de los árboles ubicados en las riberas y por lo tanto susceptibles de haber interferido con la dinámica torrencial, no suele exceder varias décadas; y raramente alcanzan edades seculares. La gestión forestal tradicional de las riberas fluviales y los propios eventos de avenida torrencial hacen que sólo existan pies aislados con edades útiles para estos fines.

Además se da la circunstancia de que las mejoras estadísticas introducidas con series de datos no siste-

máticos de corta extensión temporal, son parecidas, tanto en el caso de únicamente disponer de fechas y número de eventos que superan un valor umbral de magnitud, como en el caso de disponer de los valores exactos de magnitud (por ejemplo, caudal). Por ello, la adquisición de datos, y por lo tanto la estrategia del muestreo, está condicionada por la posible longitud temporal del registro dendrogeomorfológico, determinado en primera instancia por la edad de los árboles presentes en las márgenes de la corriente analizada. De tal manera que en riberas con árboles jóvenes, de edades inferiores a los 50 años, y con registros sistemáticos (estaciones de aforo o pluviométricas) fiables, la aplicación de técnicas dendrogeomorfológicas sólo tiene sentido para la calibración de los métodos, y no para hacer mejoras en la estimación de frecuencias en el tramo alto de la función de distribución (bajas frecuencias, altos periodos de retorno). Esos métodos, calibrados y validados en esas corrientes aforadas, sirven, eso sí, para constituir las únicas series útiles en la estimación de frecuencia de eventos en las corrientes sin registro sistemático fiable, que son la amplia mayoría en las zonas montañosas de nuestro país.

Otra fuente de incertidumbres en las posibles mejoras introducidas por estas técnicas en la estimación de magnitudes se relaciona con el significado y la validez de los indicios a introducir en los modelos hidráulicos. De todos los indicios macro y microscópicos (ver apartado de campo), tan sólo una pequeña porción son útiles en la estimación de magnitudes; entre ellos, destacan los descortezados por impacto de la carga sólida. Sin embargo, la altura de esos descortezados, utilizada como altura mínima alcanzada por la lámina de agua, tiene una serie de inconvenientes, ya que el impacto del descortezado pudo ser generado por una amplia gama de elementos (desde flotantes a carga de fondo por arrastre, pasando por saltación y rodadura), cuya interpretación hidráulica es muy diferente. La propia presencia de carga sólida, en distintas proporciones (porcentaje) y tipologías (naturaleza, tamaños...) introduce otras incertidumbres acerca de la naturaleza del flujo, ya que hace variar la densidad y viscosidad del mismo, y por lo tanto su reología y la validez de inferir caudales totales (líquido + sólido) a partir de la altura del indicio, empleando las fórmulas y modelos de la Hidráulica fluvial clásica (Pierson y Costa, 1987).

Mucho más esperanzadoras son las mejoras que estas técnicas dendrogeomorfológicas introducen en el estudio de la magnitud de eventos pretéritos cuando se trata, no de estimar caudales, calados o velocidades de la corriente, sino la extensión del área afectada. En este sentido, igual que se han obtenido

resultados positivos para aludes y corrientes de derrubios (Bollschweiler y Ehmisch, 2003; Bollschweiler *et al.*, 2006; Stoffel *et al.*, 2003, 2005 y 2006), la Dendrogeomorfología permite delimitar con precisión la evolución de la actividad en los canales y lóbulos de abanicos y conos de deyección (Ehmisch y Bollschweiler, 2005), tan útil en la evaluación de su peligrosidad.

El proyecto Dentro-Avenidas

El proyecto de investigación Dendro-Avenidas se está desarrollando en el IGME, con la participación de investigadores de otros organismos públicos, fundamentalmente universidades. La finalidad última de este proyecto, cuyo título completo es "Mejoras en la estimación de la frecuencia y magnitud de avenidas torrenciales mediante técnicas dendrogeomorfológicas", es investigar sobre la aplicación de fuentes de datos y métodos científicos procedentes del análisis dendrogeomorfológico, a la mejora de las estimaciones de la frecuencia y magnitud de las avenidas torrenciales, con vistas a implementar medidas preventivas más adecuadas en la mitigación de los riesgos asociados. Por lo tanto, los objetivos concretos del proyecto son:

1. Ensayar diversos métodos dendrogeomorfológicos y su validez para la reconstrucción de eventos de avenida torrencial en corrientes sin otra información histórica, paleohidrológica e hidrometeorológica de partida.
2. Calibrar y validar los resultados obtenidos con los métodos dendrogeomorfológicos, comparándolos con los calculados a partir del empleo de otras técnicas clásicas de análisis de la peligrosidad.
3. Estimar cuantitativamente las mejoras que introduce la incorporación de datos dendrogeomorfológicos en el análisis estadístico de frecuencias y magnitudes de avenida.
4. Realizar una propuesta metodológica válida para hacerla extensiva en su aplicación a otras corrientes torrenciales fuera del ámbito geográfico donde se ha llevado a cabo los ensayos, calibraciones y validaciones.

En principio, a partir de un análisis de evaluación multicriterio con SIG, se han seleccionado como zonas piloto el conjunto de las cabeceras montañosas en las cuencas altas de los ríos Alberche y Tiétar (cuenca del Tajo, Sierra de Gredos, Ávila), Eresma y Lozoya (cuencas del Duero y Tajo, Sierra de Guadarrama, Segovia y Madrid), y Alto Tajo y Serranía de Cuenca (Sistema Ibérico, Guadalajara y Cuenca).

Conclusiones

La aplicación de fuentes de datos y el uso de métodos científicos procedentes del análisis dendrogeomorfológico pueden contribuir a la mejora de las estimaciones de la frecuencia y magnitud de las avenidas torrenciales, con vistas a implementar medidas preventivas más adecuadas en la mitigación de los riesgos asociados. Ello se debe a que pueden utilizarse para completar (e incluso suplir) el registro sistemático y paleohidrológico de avenidas torrenciales que han acontecido en esa corriente. Sin embargo es necesario un enorme rigor metodológico y la sistematización de las distintas etapas y actividades, para no introducir errores en el proceso; y ser conscientes de las limitaciones metodológicas y de aplicación en determinadas ocasiones, requiriendo adaptaciones a las particularidades de la zona de estudio.

Agradecimientos

La elaboración de este trabajo se enmarca en el proyecto de investigación Dendro-Avenidas (CGL2007-62063/HID), financiado por la Dirección General de Investigación (MEC) en el marco del Plan Nacional de I+D+I (2004-2007); Programa Nacional de Biodiversidad, Ciencias de la Tierra y Cambio Global; Subprograma de Hidrología.

Los autores quieren agradecer la colaboración en el mismo de los entes promotores observadores del proyecto: Unidades de Protección Civil de Ávila y Segovia (Subdelegaciones del Gobierno, Ministerio de Administraciones Públicas), Servicio de Protección Civil de la Consejería de Justicia y Protección Ciudadana (Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha), Montes de Valsaín (Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente), y Departamento de Medio Ambiente de Arnaiz Consultores. Asimismo a las entidades que han concedido autorizaciones y permisos para la realización de los estudios: Ayuntamiento de Navalunga (Ávila), Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León, Confederación Hidrográfica del Tago, y Asocio de Ávila.

Igualmente desean agradecer sus comentarios a los revisores del manuscrito original, el Dr. Juan José Durán Valsero (IGME) y la Dra. Guillermina Garzón Heydt (UCM), cuyas sugerencias y correcciones han mejorado el artículo final.

Referencias

Alestalo, J. 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia*, 105, 1-140.

- Ballesteros, J. 2007. Dendrogeomorfología, Logroño, 29/12/2007, <http://www.dendrogeomorfologia.info>, e-mail: ja.ballesteros@igme.es
- Benito, G. y Thorndycraft, V. 2004. Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation: an introduction. En: Benito, G. y Thorndycraft, V.R. (eds.), *Systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation: Methodological guidelines*. CSIC- Centro de Ciencias Medioambientales, Madrid, 5-14.
- Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Martín-Duque, J.F., Rubiales, J.M., Godfrey, A., Pedraza, J., Carrasco, R.M. y Sanz, M.A. 2005. Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: Two examples from Central Spain. *Catena*, 64, 81-102.
- Bollschiweiler M. y Ehmisch M. 2003. Past debris flow activity from tree-ring analysis at the Bruchji torrent, Valais, Switzerland. *Proceedings of the DENDROSYMPOSIUM 2003*, Utrecht, vol. 2, 31-35.
- Bollschiweiler, M., Stoffel, M. y Ehmisch, M. 2006. Channel activity of debris flows on forested cones- a case study using dendrogeomorphology. *Geophysical Research Abstracts*, 8, 06463.
- Bollschiweiler, M., Stoffel, M., Schneuwly, D. y Bourqui, K. 2007. Where do tangential rows of traumatic resin ducts occur in *Larix deciduas* that have been impacted by debris flows? *Geophysical Research Abstracts*, 9, 02593.
- Brunner, G.W. 2002. HEC-RAS, *River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydraulic Engineering Center (HEC), Davis, 350 pp.
- Colmenares, D. 1637. *Historia de la Insigne Ciudad de Segovia y Compendio de las Historias de Castilla*. Diego Díez Impresor, Segovia, 652 pp.
- Cook, E.R. 1990. A conceptual linear aggregate model for tree rings. En: Cook, E.R. y Kairiukstis, L.A. (eds.), *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (Netherlands), 98-104.
- Coriell, F. 2002. *Reconstruction of a paleoflood chronology for the Middlebury River Gorge using tree scars as flood stage indicators*. Unpublished senior thesis, Middlebury College, Department of Geology, Middlebury, VT 05753, 45 pp.
- Daugherty, R.L., Franzini, J.B. y Finnemore, E.J. 1989. *Fluid mechanics with Engineering Applications*. McGraw Hill, Singapore, 596 pp.
- Díez, A. 2001-2003. *Geomorfología e Hidrología fluvial del río Alberche. Modelos y SIG para la gestión de riberas*. Serie Tesis Doctorales nº 2. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España (Ministerio de Ciencia y Tecnología), Madrid, 587 pp.+ anexo + CD-ROM.
- Díez, A. 2002. Condicionantes geomorfológicos de las avenidas y cálculo de caudales y calados. En: Ayala-Carcedo, F.J. y Olcina Cantos, J. (coords.), *Riesgos Naturales*. Editorial Ariel, Barcelona, 921-952.
- Díez, A., Laín, L. y Llorente, M. 2006. *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 230 pp.

- Díez, A., Moya, J., Corominas, J., Bodoque, J.M., Muntán, E., Gutiérrez, E., Oller, P., Furdada, G., Vilaplana, J.M., Martín-Duque, J.F., Rubiales, J.M., Génova, M., García, C., Martí, G. y Ballesteros, J.A. 2007. Dendrogeomorphological studies for natural hazards research in the Iberian Peninsula (Spain and Andorra). *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 9, 07036.
- Douglass, A.E. 1909. Weather cycles in the growth of big trees. *Monthly Weather Review*, 37(5), 225-237.
- Douglass, A.E. 1914. A method for estimating rainfall by the growth of trees. En: E. Huntington, *The Climatic Factor as Illustrated in Arid America*. Publication 192. Carnegie Institute of Washington, Washington D.C., 101-121.
- Ehmisch, M. y Bollschweiler, M. 2005. Temporal and spatial variations of debris-flow activity on a forested cone – a dendrogeomorphological approach. *Eurodendro 2005, International Conference of Dendrochronology*, Viterbo.
- Francés, F. 1998. Uso de la distribución de probabilidad TCEV. *Ingeniería del Agua*, 5 (1), 44-58.
- Francés, F. 2004. Flood frequency analysis using systematic and non-systematic information. En: Benito, G. y Thorndycraft, V.R. (eds.), *Systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation: Methodological guidelines*. CSIC- Centro de Ciencias Medioambientales, Madrid, 55-70.
- Fritts, H.C. 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, New York, 567 pp.
- Grissino-Mayer, H.D. 1993. An updated list of species used in tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin*, 53, 17-43.
- Grissino-Mayer, H.D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205-221.
- Harrison, S.S. y Ried, J.R. 1967. A flood-frequency graph based on tree-scar data. *Proc. N. D. Acad. Sci.*, 21, 23-33.
- Heritage G. y Hetherington, D. 2007. Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 66-74.
- Hupp, C.R. 1984. Dendrogeomorphic evidence of debris flow frequency and magnitude at Mount Shasta, California. *Environ. Geol. Water Sci.*, 6(2), 121-128.
- Hupp, C.R. 1986. Botanical evidence of floods and paleoflood frequency. *International Symposium on Flood Frequency and Risk Analysis*, Baton Rouge, Louisiana.
- Hupp, C.R. 1988. Plant Ecological Aspects of *Flood Geomorphology and Paleoflood History*. En: Baker, V.R., Kochel, R.C. y Patton, P.C. (eds.), *Flood Geomorphology*. John Wiley and Sons, Chichester (UK), 335-356.
- Hupp, C.R., Osterkamp, W.R. y Thornton, J.L. 1987. Dendrogeomorphic evidence and dating of recent debris flows on Mount Shasta, northern California. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 1396-B, B1-B39.
- La Marche, V.C. Jr. 1963. Origin and geologic significance of buttress roots of bristlecone pines, White Mountains, California, U.S. *Geological Survey Professional Paper*, 475-C, C149-C150.
- Lang, M., Fernández, J.F., Recking, A., Naulet, R. y Grau, P. 2004. Methodological guide for palaeoflood and historical peak discharge estimation. En: Benito, G. y Thorndycraft, V.R. (eds.), *Systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation: Methodological guidelines*. CSIC- Centro de Ciencias Medioambientales, Madrid, 43-53.
- McCord, V.A.S. 1990. *Augmenting Flood Frequency Estimates using Flood-Scarred Trees*. Unpublished PhD Dissertation, Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson (Arizona, USA), 182 pp.
- Miller, D.L., Mora, C.I., Grissino-Mayer, H.D., Mock, C.J., Uhle, M.E. y Sharp, Z. 2006. Tree-ring isotope records of tropical cyclone activity. *PNAS*, 103 (39) 14294-14297.
- Ouarda, T.B.M.J., Hamdi, Y. y Bobée, B. 2004. A general system for frequency estimation in hydrology (FRESH) with historical data. En: Benito, G. y Thorndycraft, V.R. (eds.), *Systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation: Methodological guidelines*. CSIC- Centro de Ciencias Medioambientales, Madrid, 71-74.
- Pierson, T.C. y Costa, J.E. 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. En: Costa, J.E. y Wieczorek, G.E. (eds.), *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation*. Geological Society of America. Review Engineering Geology, USA, 1-12.
- Rubiales, J.M., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A. y Martín-Duque, J.F. 2007. Determination of first exposure year by using dendrogeomorphological analysis of Scots pine roots. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 9, 05566.
- Saz, M.A., Peña, J.L., Longares, L.A., Creus, J. y González-Hidalgo, J.C. 2004. Evolución reciente de fondos de valle holocenos en el sector central del Valle del Ebro a partir de series de crecimiento radial de *Tamarix canariensis*. En: Peña, J.L., Longares, L.A. y Sánchez, M. (eds.), *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*, Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico, Zaragoza, 315-328.
- Schweigruber, F.H. 1996. Tree rings and environment: Dendroecology. Swiss Federal Institute of forest, snow and landscape, WSL/FNP, Birmensdorf, Bane, Stuttgart, 609 pp.
- Sigafoos, R.S. 1964. Botanical evidence of floods and flood-plain deposition. *Geol. Surv. Prof. Pap. (U.S.)*, 485-A, 1-35.
- Stedinger, J., Surani, R. y Therivel, R. 1988. *MAX Manual*. Cornell University, Ithaca, 51 pp.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M. y Hassler, G.R. 2006. Differentiating past events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity – a dendrogeomorphological approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(11), 1424-1437.
- Stoffel, M., Gärtner, H., Lièvre, I. y Monbaron, M. 2003. Comparison of reconstructed debris flow event years (Ritigraben, Switzerland) and existing flooding data in neighboring rivers. En: Rickenmann D. y Chen, C. (eds.), *Debris Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, 1, 243-253.
- Stoffel, M., Lièvre, I., Conus, D., Grichting, M.A., Raetzo, H., Gärtner, H.W. y Monbaron, M. 2005. 400 years of debris

- flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben VS, Switzerland. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 37(3), 387–395.
- Wilford, D.J., Cherubini, P. y Sakals, M.E. 2005. Dendroecology: a guide for using tree to date geomorphic and hydrologic events. B.C. Min. For., Res. Br., Victoria, B.C. *Land Manage. Handb.* No. 58, 25 pp.
- Yanosky, T.M. 1982a. Effects of flooding upon woody vegetation along parts of the Potomac River floodplain. *Geol. Surv. Prof. Pap.* (U.S.), 1206, 1-21.
- Yanosky, T.M. 1982b. Hydrologic inferences from ring widths of flood-damaged trees, Potomac River, Maryland. *Environ. Geol. Water Sci.*, 4, 43-52.
- Yanosky, T.M. 1983. Evidence of floods on the Potomac River from anatomical abnormalities in the wood of flood-plain trees. *Geol. Surv. Prof. Pap.* (U.S.), 1296, 1 51.

Recibido: noviembre 2007

Aceptado: diciembre 2007